



طراحی و تحلیل عددی یک سنسور سرعت باد پیزوالکتریک

فرشاد نیکفر^۱، حسام مکوندی^{۱*}، سید علی مرعشی^۲

۱. گروه مهندسی مکترونیک، واحد بین المللی اروند، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران.
۲. مدیر خدمات فنی شرکت صنایع پتروشیمی مسجدسلیمان، مسجدسلیمان، خوزستان، ایران.

*نویسنده مسئول: hesammakvandi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶

چکیده

بادسنج^۱ در واقع جریان باد اطراف را تبدیل به یک سیگنال استاندارد الکتریکی کرده و آن را به دیتالاگر هواشناسی یا یک نمایشگر انتقال می‌دهد. یکی از مشکلات پیش رو در استفاده از بادسنج‌های متداول در سیستم‌های نوین، ابعاد بزرگ و مصرف انرژی بالای این نوع سنسورها می‌باشد، که استفاده از آنها را در ریزسیستم‌ها و سیستم‌هایی با ابعاد میکرو را دشوار و بعضاً ناممکن می‌سازد. به عنوان نمونه در پهبادهای جمع آوری کننده اطلاعات که به صورت خودکار و مستقل از کاربر عمل می‌کنند آگاهی از شرایط آب و هوا بدون ارتباط مستقیم با مرکز از اهمیت بالایی در پایداری سیستم برخوردار است و استفاده از سنسورهای سرعت باد در اینگونه ابزارها بسیار حیاتی است. با توجه به محدودیت‌های آیرودینامیکی و نیز محدودیت‌های تامین انرژی این نوع ابزارها، استفاده از سنسورهای با ابعاد و مصرف انرژی کم در آنها الزامی است و استفاده از سنسورهای پیزوالکتریک به خوبی در این ابزارها توجیه پذیر است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس، یک نمونه سنسور پیزوالکتریک با دقت بالا طراحی و تحلیل گردید. به منظور افزایش دقت این نوع سنسور از ساختارهای آگزتیک استفاده شد. بررسی نتایج نشان داد که با کمک ساختار آگزتیک مناسب می‌توان میزان پتانسیل خروجی سنسور را تا ۳۳ درصد افزایش داد.

کلمات کلیدی: بادسنج، پیزوالکتریک، ساختار آگزتیک، افزایش دقت

مقدمه

با توسعه سریع فناوری ارتباطی و شبکه‌های حسگر بی‌سیم، دستگاه‌های پوشیدنی قابل حمل و دستگاه‌های میکروالکترونیک به طور گسترده در زندگی روزمره مورد استفاده قرار گرفته‌اند مانند زیست پزشکی، نظارت هیدرولوژیکی، حمل و نقل هوشمند، تشخیص سلامت سازه. در حال حاضر، باتری‌های خشک سنتی معمولاً در این دستگاه‌های میکروالکترونیک استفاده می‌شوند اما باتری‌های خشک مشکلات عمده‌ای همچون عمر محدود و آلودگی محیطی ناشی از دفع را دارند. بنابراین، یافتن منابع انرژی پاک جایگزین برای تامین انرژی دستگاه‌های کم مصرف یک مسئله حیاتی است که باید حل گردد. منابع انرژی تجدیدپذیر تحت شرایط طبیعی شامل باد، خورشید، اقیانوس و ارتعاش می‌باشد. برای برداشت انرژی در محیط، محققان بسیاری از دستگاه‌های برداشت انرژی را مطالعه کرده‌اند. براساس اصول مختلف تبدیل انرژی، برداشت کننده‌های انرژی را می‌توان به الکترومغناطیسی، الکترواستاتیکی، تریبولکتریک و پیزوالکتریک تقسیم نمود. برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک از اثر پیزوالکتریک مثبت مواد پیزوالکتریک برای تکمیل فرآیند تبدیل الکترومکانیکی استفاده می‌کنند. ماده پیزوالکتریک تحت تاثیر نیروی خارجی ارتعاش می‌کند، که باعث می‌شود حرکت نسبی بارهای درون ماده قطبی‌سازی گردد و در نتیجه بارهای ناهمسانگرد بر روی دو سطح عنصر پیزوالکتریک ظاهر شود.

¹ Anemometer



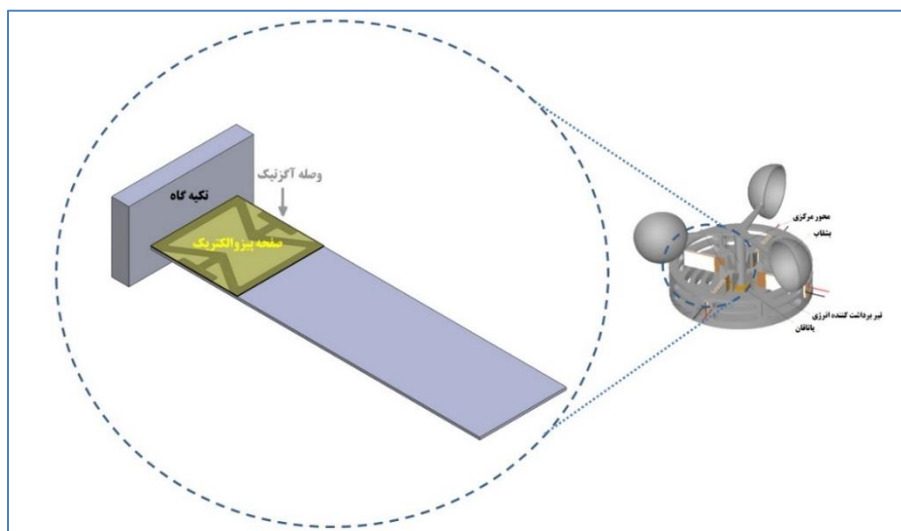
مواد پیزوالکتریک که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند، سرامیک‌های پیزوالکتریک^۱، پلی وینیلیدین فلوراید^۲ و فیبر کامپوزیت ماکرو^۳ هستند. کرنش کم، شکنندگی بالا، چگالی بالا و هزینه بالای سرامیک‌های پیزوالکتریک زمینه‌های کاربردی آن را محدود می‌کند. از آنجایی که سرامیک‌های پیزوالکتریک شکننده هستند، محققان شروع به توسعه مواد لایه نازک مانند پلی وینیلیدین فلوراید و فیبر کامپوزیت ماکرو کردند که انعطاف پذیری خوبی دارند اما دارای ولتاژ خروجی کمتری می‌باشند. برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک طراحی شده کم هزینه هستند و ساختار ساده ای دارند. با توجه به منابع مختلف انرژی، برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک در حال حاضر به برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک ارتعاشی و برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک دوار تقسیم می‌شوند. برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک ارتعاشی از یک تیر یکسرگیردار پیزوالکتریک داخلی برای جمع آوری ارتعاشات مکانیکی در محیط استفاده می‌کند. برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک دوار می‌تواند انرژی سیالات مختلف مانند انرژی باد را با کمک فن‌های خارجی و توربین‌ها جمع آوری کند. در مقایسه با برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک ارتعاشی، برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک دوار برای محیط‌های با فرکانس پایین مناسب‌تر هستند. در دهه‌های اخیر، برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک دوار مورد توجه گسترده محققان قرار گرفته‌اند، و باندهای فرکانس کاری پایین و توان خروجی کم هنوز از عوامل اصلی محدودکننده‌های انرژی پیزوالکتریک دوار هستند. روی و همکاران [۱] یک برداشت کننده انرژی دورانی پیزوالکتریک مبتنی بر نیروی گریز از مرکز را ارائه نمودند که از یک تیر پیزوالکتریک با یک جرم تشکیل شده است. دامنه و عملکرد خروجی تیر با تغییر فاصله بین تیر و مرکز چرخش تنظیم می‌گردد. سو و همکاران [۲] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک متشکل از یک تیر یکسرگیردار پیزوالکتریک و یک بلوک جرمی نوک طراحی کردند. نیروی گریز از مرکز تولید شده توسط حرکت چرخشی و اینرسی بلوک جرمی، تیر پیزوالکتریک را دچار تغییر شکل می‌نمود تا انرژی الکتریکی تولید گردد. با تغییر طرح تیر یکسرگیردار پیزوالکتریک (داخل، بیرون و شیب‌دار)، فرکانس عملیاتی سیستم را تغییر داده شد تا با فرکانس تحریک خارجی مطابقت داشته باشد و عملکرد آن بهبود یابد. او و همکاران [۳] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک بر اساس حرکت چرخشی یک توربین برای جذب انرژی باد در محیط طراحی نمودند. چرخش توربین می‌تواند میله تحریک را به سمت تیر یکسرگیردار پیزوالکتریک هدایت کند و در نتیجه باعث ایجاد ارتعاش در آن برای تولید الکتریسیته شود. آنها تاثیر تیرهای یکسرگیردار پیزوالکتریک با اشکال مختلف (مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی) بر ولتاژ خروجی نمونه اولیه را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند که حداکثر ولتاژ پیک به پیک کنسول مستطیلی پیزوالکتریک ۱۴/۲۴ ولت در سرعت باد ۱۶ متر بر ثانیه است. یانگ و همکاران [۴،۵] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک دوار با ساختار بال مرغان دریایی طراحی نمودند. ساختار بال مرغان دریایی باعث تحریک چرخشی منتقل شده توسط چرخ دنده به دو مبدل پیزوالکتریک می‌گردد، که به طور موثر می‌تواند انرژی حرکت چرخشی را جمع آوری نماید. مکی و همکاران [۶] یک سنسور فشار تاثیر بر اساس اثر پیزوالکتریک با استفاده از تغییر شکل ایجاد شده توسط تایر در تماس با زمین طراحی نمودند. عنصر پیزوالکتریک در رابط هاب ثابت می‌شود و هنگام تماس تایر با زمین، تایر تغییر شکل داده و عنصر پیزوالکتریک را برای تولید برق فشار می‌دهد. خو و همکاران [۷] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک با جفت مغناطیسی را پیشنهاد نمودند که از یک محفظه، تیر U شکل و روتور تشکیل شده بود. هنگامی که روتور می‌چرخید، آهن‌ربای روی تیر با آهن‌ربای روی روتور جفت شده و مواد پیزوالکتریک روی تیر نیز تغییر شکل داده و الکتریسیته تولید می‌نمودند. خدایاری و همکاران [۸] با استفاده از پلیمر پلی وانیلیدین فلوراید یک نمونه آزمایشگاهی از سنسور سرعت باد ساختند. پلیمر پیزوالکتریک به صورت تیر یک سرگیردار درون محفظه تونل باد مادون صوت قرار گرفته و از مدار استاندارد DC برای تبدیل ولتاژ AC پیزوالکتریک به ولتاژ DC و همچنین از یک تقویت کننده عملیاتی به منظور تقویت ولتاژ استفاده نمودند. در نهایت با انجام آزمایشات مختلف بر روی سنسور، رابطه بین ولتاژ خروجی سنسور و سرعت باد بدست

¹ Lead Zirconate Titanate (PZT)² Polyvinylidene fluoride (PVDF)³ Macro Fiber Composite (MFC)



آوردند. نتایج آزمایشات نشان داد که رابطه بین سرعت باد و ولتاژ پیزوالکتریک یک رابطه خطی است و می‌توان از آن به‌منظور محاسبه سرعت باد استفاده نمود. ژو و همکاران [۹] با پرینتر سه بعدی یک ساختار آگزتیک روی یک نانو ژنراتورهای پیزوالکتریک مبتنی بر فیلم پلیمری، تغییر شکل خمشی نانو ژنراتورهای پیزوالکتریک را به تغییر شکل کششی در صفحه تبدیل نمودند. آنها به این روش، اثر سنکلاستیک ساختار آگزتیک را برای اولین بار در دستگاه جمع‌آوری انرژی انعطاف‌پذیر اعمال نموده و موفق شدند تغییر شکل خمشی استفاده نشده قبلی روی یک لایه را به وسیله‌ای ارزشمند برای برداشت انرژی تبدیل نمایند و به این روش ولتاژ خمشی خروجی نانو ژنراتورهای پیزوالکتریک را $\frac{8}{3}$ برابر افزایش دهند. آنها از نانو ژنراتورهای پیزوالکتریک به کمک ساختار آگزتیک به عنوان یک حسگر برای سنجش زاویه خمش و نظارت بر حرکت با نصب روی مفاصل مختلف بدن انسان و انگشت روباتیک نرم استفاده نمودند. اقبالی و همکاران [۱۰] از ساختارهای آگزتیک برای افزایش کارایی تکه‌های دایره‌ای پیزوالکتریک در برداشت انرژی ارتعاشی استفاده نمودند. آنها از زنگ‌های پیزوالکتریک، که عناصر ارزان قیمت و به‌راحتی در دسترس هستند، استفاده نمودند. نتایج بدست آمده توسط ایشان از طریق مدل‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی، تحلیل و تایید گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که برای دو طرح آگزتیک پیشنهادی، در فرکانس رزونانس، می‌توان به ضریب بزرگ‌نمایی $\frac{10}{2}$ و $\frac{13}{3}$ نسبت به برداشت کننده انرژی ساده دست یافت. ویژگی مهم دیگر این است که فرکانس تشدید در این طرح‌های جدید بسیار کمتر از تشدید کننده‌های معمولی است. چن و همکاران [۱۱] با استفاده از تحلیل المان محدود یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک آگزتیک غیرخطی را طراحی و تحلیل نمودند. این برداشت کننده از یک تیر دو سر گیردار با ساختارهای آگزتیک استفاده می‌نمود که باعث بهبود کارایی و پهنای باند برداشت انرژی می‌گردید. در اعتبارسنجی تجربی، توان خروجی دو نوع برداشت کننده انرژی آگزتیک ۱۷۳ درصد و ۹۴ درصد بیشتر از برداشت کننده انرژی غیرخطی معمولی بود. علاوه بر این، مشاهده گردید که پهنای باند دو نوع برداشت کننده انرژی آگزتیک در مقایسه با سیستم‌های خطی ۱۵۵۶٪ و ۲۱۴۲٪ افزایش یافته است.

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار آباکوس به طراحی و مدل‌سازی یک سنسور بادی پیزوالکتریک مطابق شکل (۱) پرداخته می‌شود. با استفاده از داده‌های هندسی مرجع [۱۲] و از نتایج بدست آمده توسط روش اجزا محدود به منظور بررسی تاثیر ساختارهای آگزتیک بر خروجی سیستم استفاده خواهد شد. هدف تحقیق بررسی امکان استفاده از ساختارهای آگزتیک به منظور افزایش دقت سنسورهای پیزوالکتریک می‌باشد. به این منظور به کمک روش معرفی شده تاثیر پارامترهای مختلف بر دقت سنسور مورد نظر بررسی می‌گردد.



شکل ۱: شماتیک بادسنج و تیر برداشت کننده انرژی مورد استفاده

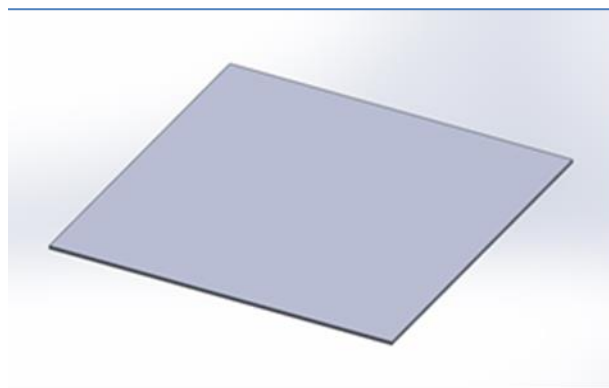


مدل‌سازی اجزا محدود

با استفاده از داده‌های ارایه شده در مرجع [۱۲] مدل‌های هندسی مشابه شکل (۲) در نرم افزار سالی‌دورکز ساخته می‌شود. پس از آن مدل‌های هندسی جهت ساخت مدل اجزای محدود و تحلیل آن به نرم‌افزار آباکوس ارسال می‌گردد. پس از مدل‌سازی متناسب با هندسه سازه مورد نظر، با المان‌بندی مدل و اعمال خواص مواد و همچنین اعمال شرایط مرزی و بارگذاری خمشی بر مدل، مدل اجزای محدود مسئله ایجاد می‌شود. در المان‌بندی مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی رفتار مدل فیزیکی به بهترین نحو، المان‌های C3D20R و C3D20RE انتخاب گردیدند.



(الف) تیر ساده



(ب) آگزتیک ۱



(ج) آگزتیک ۲

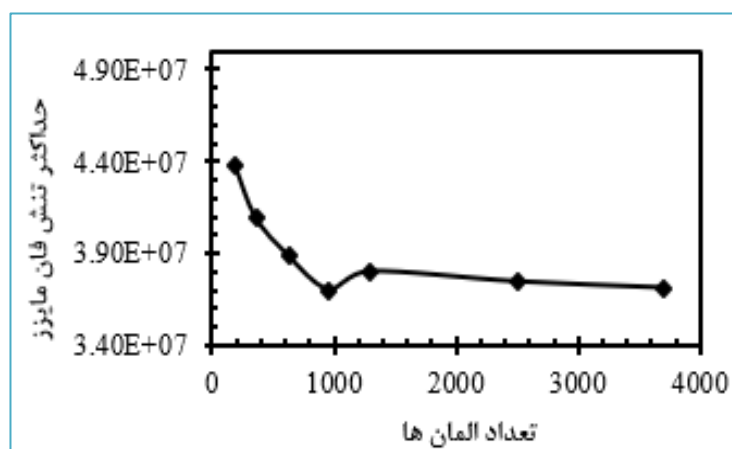


(د) آگزتیک ۳

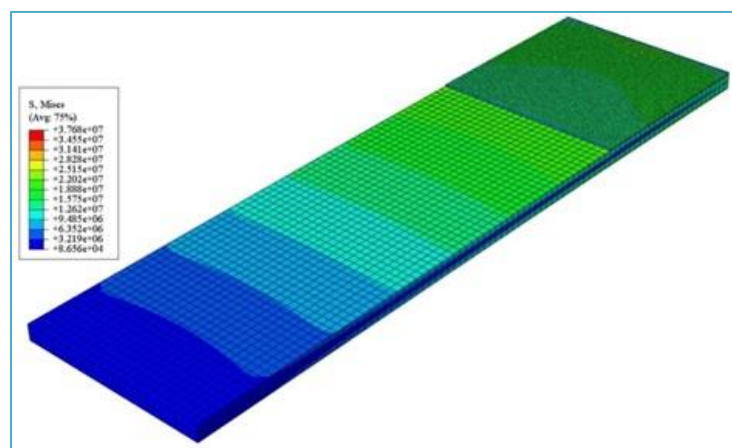
شکل ۲: مدل‌های هندسی تیرهای ساخته شده در نرم افزار سالی‌دورکز

نتایج تحلیل

در ادامه نتایج بدست آمده برای مدل نخست استفاده شده در این پژوهش ارایه می‌گردد. به منظور بررسی همگرایی نتایج حاصل توزیع تنش ون مایز در صفحه پیزو الکتریک متصل به تیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان داد که با استفاده از ۱۳۰۰ المان می‌توان به دقت مناسب دست یافت. نمودار همگرایی نتایج برحسب میزان تنش در تعداد المان‌های متفاوت در شکل (۳) ارایه شده است. توزیع تنش به ازای ۳۶۰۰ المان در شکل (۴) نمایش داده شده است.

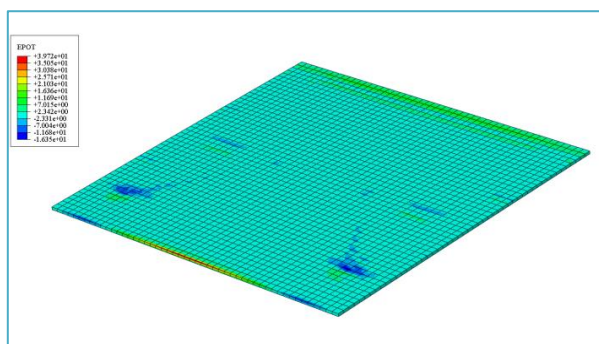


شکل ۳: همگرایی نتایج بدست آمده به ازای مقادیر متفاوت المان‌های پیزوالکتریک

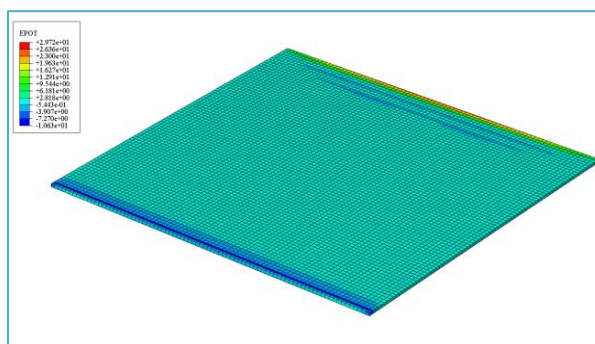


شکل ۴: توزیع تنش به ازای ۳۶۰۰ المان پیزوالکتریک

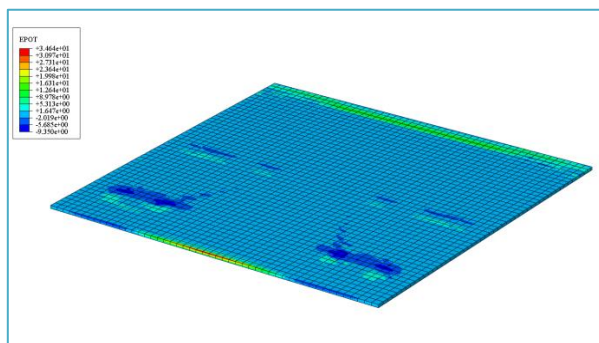
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که در حالتی که از وصله‌های آگزتیک استفاده شده است میزان حداکثر تنش القا شده در صفحه پیزوالکتریک نسبت به استفاده از پایه ساده افزایش می‌یابد. میزان این افزایش برای ساختار آگزتیک ۱، آگزتیک ۲ و آگزتیک ۳، به ترتیب ۱۴٪، ۲۲٪ و ۸٪ می‌باشد که ناشی از تاثیر وصله آگزتیک مورد استفاده می‌باشد. همچنین نتایج نشان‌دهنده افزایش پتانسیل الکتریکی القا شده در صفحه پیزوالکتریک با استفاده از وصله آگزتیک می‌باشد. در شکل (۵) مشاهده می‌گردد که ساختار آگزتیک ۲ موجب افزایش ۱۶.۷۵٪ و ساختار آگزتیک ۲ موجب افزایش ۱٪ پتانسیل الکتریکی القا شده در صفحه می‌شود که ناچیز و قابل اغماض است. ساختار آگزتیک ۱ با افزایش ۳۳.۶۴٪ پتانسیل الکتریکی القا شده، بیشترین افزایش را در پتانسیل الکتریکی موجب می‌گردد، بنابراین در استفاده از این نوع وصله، کارایی بیشتری مورد انتظار است. در ادامه به منظور بررسی تاثیر ضخامت وصله‌های آگزتیک بر نتایج بدست آمده به بررسی تاثیر استفاده از وصله‌هایی با ضخامت دو برابر پرداخته شده است. در شکل (۶) توزیع پتانسیل الکتریکی برای صفحه پیزوالکتریک برای وصله‌های آگزتیک با ضخامت دوبرابر حالت قبل نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در حالتی که از پایه‌های آگزتیک با ضخامت بیشتر استفاده شده است میزان حداکثر پتانسیل القا شده در صفحه پیزوالکتریک نسبت به وصله با ضخامت کمتر تفاوت می‌یابد. میزان این تفاوت برای ساختار آگزتیک ۱، آگزتیک ۲ و آگزتیک سه، به ترتیب ۳٪، ۳٪ و ۰.۶٪ می‌باشد که قابل صرف نظر می‌باشد و افزایش یا کاهش ارزش‌مندی را شامل نمی‌شود.



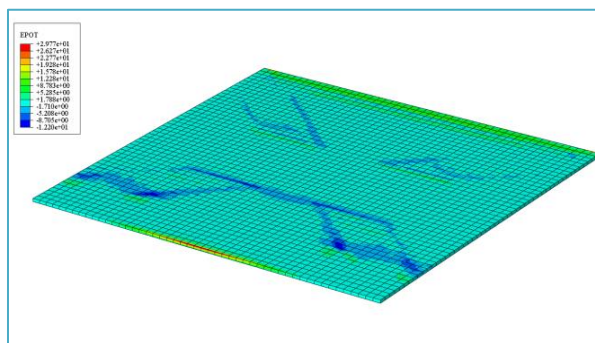
(ب)



(الف)

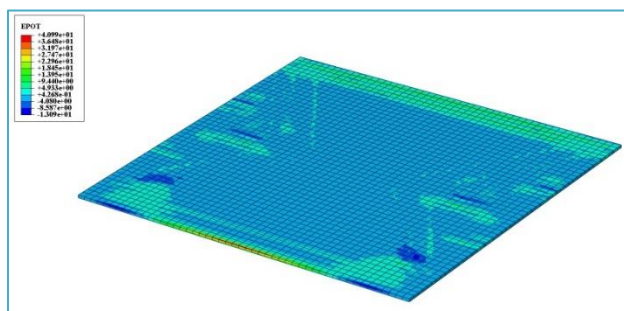


(د)

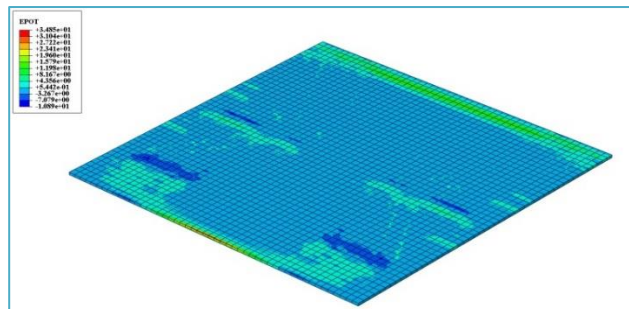


(ج)

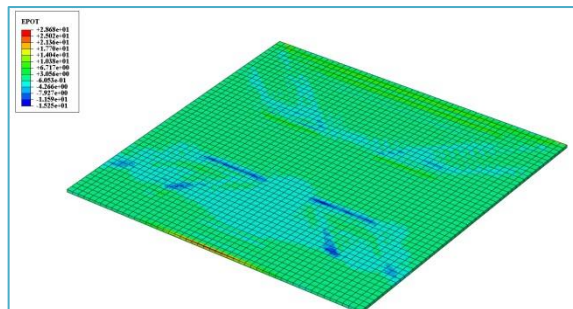
شکل ۵: توزیع پتانسیل الکتریکی بر صفحه پیزوالکتریک متصل به ساختار (الف) تیر ساده (ب) آگزتیگ ۱ (ج) آگزتیگ ۲ (د) آگزتیگ ۳



(الف) آگزتیگ ۱



(ج) آگزتیگ ۳

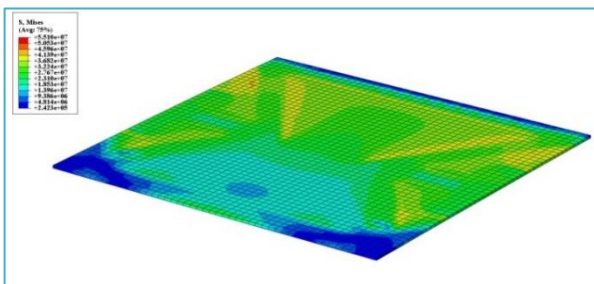


(ب) آگزتیگ ۲

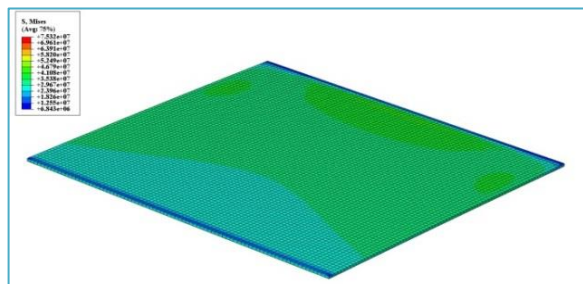
شکل ۶: توزیع پتانسیل الکتریکی صفحه پیزوالکتریک متصل به وصله‌های آگزتیگ متفاوت



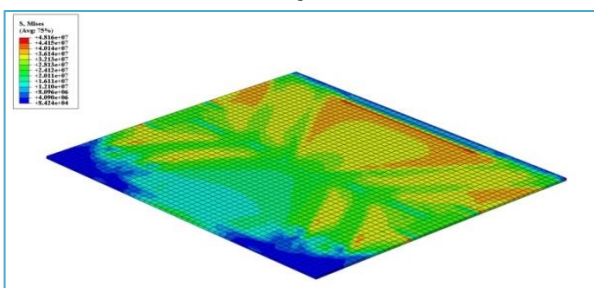
همچنین به منظور بررسی تاثیر جابجایی بزرگتر ناشی از جریان‌های باد شدیدتر، نتایج به ازای جابجایی دو برابر نیز استخراج گردیده است که در شکل‌های (۷) و (۸) نمایش داده شده‌اند.



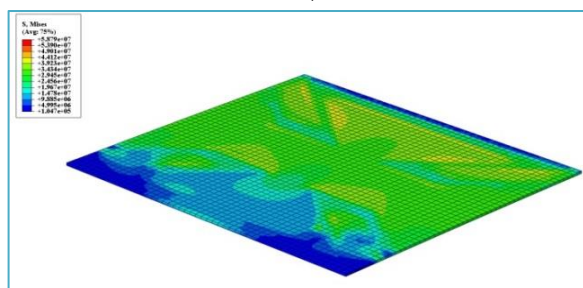
(ب) آگزتیک ۱



(الف) پایه ساده

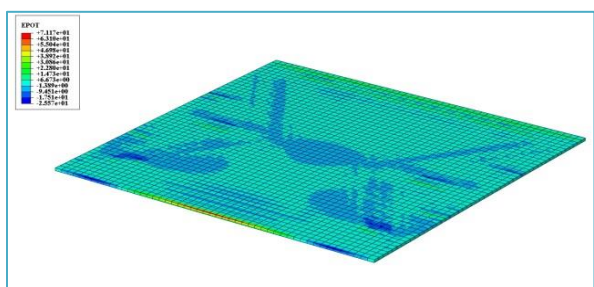


(د) آگزتیک ۳

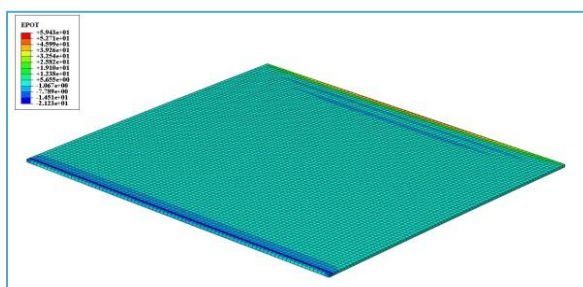


(ج) آگزتیک ۲

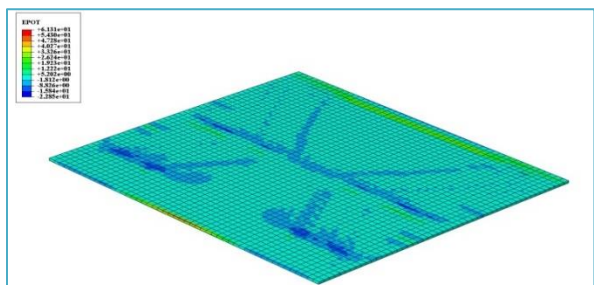
شکل ۷: چگونگی توزیع تنش در صفحات پیزوالکتریک



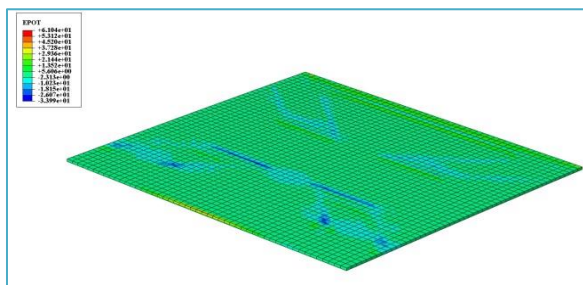
(ب) آگزتیک ۱



(الف) پایه ساده



(د) آگزتیک ۳



(ج) آگزتیک ۲

شکل ۸: چگونگی توزیع پتانسیل الکتریکی در صفحات پیزوالکتریک



با بررسی این تصاویر مشخص می‌گردد که با افزایش جابجایی سر آزاد تیر مورد نظر، مطابق انتظار تنش القا شده، پتانسیل الکتریکی القا شده و نیز شار الکتریکی در همه مدل‌ها افزایش می‌یابد. از آنجا که پتانسیل الکتریکی القا شده در ورق پیزوالکتریک از اهمیت به سزایی برخوردار است و اساس استفاده از این نوع ساختارها را به عنوان سنسورهای کوچک تشکیل می‌دهند به طور خاص می‌توان مشاهده نمود که با استفاده از ساختار آگزتیک ۱ میزان پتانسیل القا شده در صفحه پیزوالکتریک ۱۹.۵۷٪ افزایش یافته است که در مقایسه با سایر وصله‌های آگزتیک بررسی شده، افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. برای ساختارهای آگزتیک ۲ و ۳ میزان افزایش به ترتیب برابر با ۲.۷٪ و ۳.۱۶٪ می‌باشد که کمتر از وصله آگزتیک ۱ بوده و تقریباً با یکدیگر مشابه هستند. همچنین مشاهده می‌شود که میزان افزایش پتانسیل الکتریکی با استفاده از وصله‌های آگزتیک ۲ و ۳ چندان مطلوب نمی‌باشد و افزایش محسوسی در این حالت ایجاد نشده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی نتایج حاصل از حل اجزای محدود ساختار پیزوالکتریک بر روی بسترهایی با شکل‌ها و تغییرشکل‌هایی متفاوت پرداخته شد. مدل‌سازی ساختار با استفاده از نرم‌افزارهای سالی‌دورکز و آباکوس انجام شده و برای حل مدل ایجاد شده، نخست مدل به کمک روش المان محدود گسسته و سپس پاسخ به ازای پارامترهای ورودی‌های مختلف محاسبه گردیده است. پس از اطمینان از صحت عملکرد روش معرفی شده، نتایج به ازای ابعاد و جنس‌های مختلف تیر برداشت‌کننده انرژی بررسی گردید. مقایسه نتایج حاصل نشان داد که استفاده از وصله‌های آگزتیک نسبت به وصله‌های ساده موجب افزایش پتانسیل القا شده در صفحه پیزو الکتریک می‌گردد. بنابراین در شرایط تغییرشکل یکسان استفاده از وصله‌های آگزتیک توصیه می‌گردد. در نهایت نتیجه گردید که استفاده از ساختار آگزتیک می‌تواند موجب افزایش ۳۳.۶۴٪ پتانسیل الکتریکی القا شده در پیزوالکتریک شود.

مراجع

- [1] Rui, X.B., Zeng, Z.M., Zhang, Y., Li, Y.B., Feng, H., Huang, X.J., Sha, Z., (2020). Design and experimental investigation of a self-tuning piezoelectric energy harvesting system for intelligent vehicle wheels, IEEE Transactions on Vehicular Technology. 69 (2), pp 1440–1451.
- [2] Su, W.J., Lin, J.H., Li, W.C., (2020). Analysis of a cantilevered piezoelectric energy harvester in different orientations for rotational motion. Doi.org/10.3390/s20041206.
- [3] He, L.P., Han, Y.H., Liu, R.W., Hu, R.H., Yu, G., Cheng, G.M., (2022). Design and performance study of a rotating piezoelectric wind energy harvesting device with wind turbine structure. Doi.org/10.1016/j.energy.2022.124675.
- [4] Yang, B., Yi, Z.R., Tang, G., Liu, J.Q., (2019). A gullwing-structured piezoelectric rotational energy harvester for low frequency energy scavenging. Doi.org/10.1063/1.5110368.
- [5] Yi, Z.R., Yang, B., Zhang, W.M., Wu, Y.D., Liu, J.Q., (2021). Batteryless tire pressure real-time monitoring system driven by an ultralow frequency piezoelectric rotational energy harvester. Doi.org/10.1109/tie.2020.2978727.
- [6] Makki, N., Pop-Iliev, R., (2012). Battery-and wire-less tire pressure measurement systems (TPMS) sensor. Doi.org/10.1007/s00542-012-1480-6.
- [7] Hu, X.B., Li, Y., Xie, X.D., (2019). A study on a U-shaped piezoelectric coupled beam and its corresponding ingenious harvester. Doi.org/ 10.1016/j.energy.2019.07.084.

[۸] ا. خدایاری، ص. محمدی، ا. مختاری، م. رحیمی، طراحی و ساخت سنسور سرعت با استفاده از ماده پیزوالکتریک، چهارمین کنفرانس بین‌المللی علوم و مهندسی، ۱۳۹۵.



- [9] Zhou, X., Parida, K., Chen, J., Xiong, J., Zhou, Z., Jiang, F., Xin, Y., Magdassi, S., Lee, P.S., (2023). 3D Printed Auxetic Structure-Assisted Piezoelectric Energy Harvesting and Sensing, Doi.org/10.1002/aenm.202301159 .
- [10] Eghbali, P., Younesian, D., Moayedizadeh, A., Ranjbar, M., (2020). Study in circular auxetic structures for efficiency enhancement in piezoelectric vibration energy harvesting. Scientific reports 10, Article 16338.
- [11] Chen, K., Gao, Q., Fang, S., Zou, D., Yang, Z., Liao, W.H., (2021). An auxetic nonlinear piezoelectric energy harvester for enhancing efficiency and bandwidth, Applied Energy, 298, Article 117274, Doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117274.
- [12] Sadi, M., Makvandi, H., Azemati, A., (2024). Design and analysis of a piezoelectric wind generator with an auxetic structure using the finite element method. Journal of new applied and computational findings in mechanical systems, 1(4), pp 46-55.